

## 別紙 4

|          |         |
|----------|---------|
| 報告番<br>- | ※ 甲 第 号 |
|----------|---------|

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Constraints on Primordial Magnetic Fields with Cosmic Microwave Background and 21-cm Line Observations (宇宙マイクロ波背景放射と 21cm 線の観測による原始磁場の制限)  
氏 名 箕田 鉄兵

## 論 文 内 容 の 要 旨

多くの銀河や銀河団で磁場の存在が報告されているが、これらの磁場の起源は未解明である。現在考えられている有力なシナリオの一つは、初期宇宙において生成された微弱な磁場（以下、原始磁場と呼ぶ）が現在観測される天体の磁場の種になったという仮説である。しかしながら、原始磁場の存在を示す観測データはほとんど得られていない。一方、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）や大規模構造の観測によって、原始磁場の強度に対する上限値が与えられている。本論文では原始磁場が CMB の温度と偏光の非等方性に与える影響の再考察を行い、最新の観測データを用いた制限を行った。また、新しい観測量として中性水素 21-cm 線のグローバルシグナルに着目し、原始磁場がこの観測量に与える影響と近年の観測データからの制限について議論を行った。

本論文ではまず、原始磁場が陽子と電子の速度場に与える影響の見積もりを行った。原始磁場が存在していたとすれば、磁場がビッグバン中の陽子や電子の運動に影響を与える。これらの荷電粒子は CMB 光子とトムソン散乱によって強く結合しているため、原始磁場が荷電粒子の運動に与える影響は CMB の温度揺らぎや偏光成分として観測されることになる。実際にはこれらは観測されていないことから、原始磁場の強度に対して制限を与えることができる。プランク衛星などの CMB の観測により、原始磁場の強度にはおよそ 4.4 ナノガウスの上限が得られている。本論文では、先行研究で議論されていなかった、光子の平均自由行程よりも小さいスケール

ルにおける荷電粒子の速度場のゆらぎを計算し、観測される CMB 光子の温度と偏光の非等方性の計算を行った。この結果、プランク衛星の角度分解能より小さいスケールにおいても、原始磁場によって CMB の非等方性が生じることがわかった。そこで、プランク衛星よりも小さい角度分解能を持つ、南極点望遠鏡の観測データを用いた原始磁場の強度の制限を行った。これによって、原始磁場の強度に対して 1.5 ナノガウスという上限を与えることができた。

次に、本論文ではスニヤエフ・ゼルドビッチ効果 (SZ 効果)によって作られる温度ゆらぎについて議論を行った。ここで SZ 効果とは、CMB 光子が大規模構造などに存在する高温のガスに散乱されることで CMB 光子の温度が周波数に依存して見かけ変化する現象のことである。原始磁場が存在すれば宇宙の大規模構造の進化にも影響を与えることが先行研究で指摘されている。とりわけ、原始磁場によるローレンツ力がガスの密度進化に与える影響と、磁場のエネルギー散逸がガスの温度進化に与える影響の重要性が活発に議論されてきた。本論文ではこれらの影響を考慮してガスの密度と温度の時間進化を計算し、得られたガスの物理量の値から SZ 効果によってつくられる CMB 温度揺らぎを見積もった。計算の結果、原始磁場は見込み角度が約 1 秒角の非常に小さいスケールで大きな CMB 温度揺らぎを作ること、この CMB 温度揺らぎは銀河間空間のガス密度が低い領域において引き起こされていることを示した。

さらに、本論文では新しい観測量である中性水素 21-cm 線のグローバルシグナルを用いた原始磁場の制限についても議論をおこなった。中性水素 21-cm 線は水素原子の超微細構造に起因する電磁波であり、その全天での平均強度であるグローバルシグナルは水素ガスの平均温度に強く依存する。近年、オーストラリアの電波観測機器 Experiment to Detect the Global EoR Signature (EDGES)が 21-cm 線グローバルシグナルの検出を報告している。この観測結果によると赤方偏移が 15 から 20 の時代の水素ガスの平均温度は CMB 温度よりも小さかったことが示唆されている。したがって、EDGES の観測結果は水素ガスの宇宙論的な加熱源に対して制限を与えることができ、本論文では、この水素ガスの加熱源として原始磁場のエネルギー散逸を考えた。原始磁場の強度とそのスケール依存性の二つのパラメータに対してエネルギー散逸に伴うガスの加熱率を表し、宇宙論的なガスの温度進化を計算して、EDGES の観測による原始磁場の強度に制限を与えた。この結果、原始磁場の Mpc スケールでの強度が 0.1 ナノガウス以下であるという制限を得た。